



电工学教学小丛书

负反馈

王鸿明 杨孟琢 编



高等教育出版社

电工学教学小丛书

负 反 馈

王鸿明 杨孟琢 编

高等教育出版社

本书是全国高等学校工科电工教材编审委员会电工学编审小组计划编写的电工学教学小丛书之一。

在电工学课程教学中，负反馈问题是一个重点，也是难点。为帮助非电专业学生加深理解这方面内容，编者在本书中对电子放大电路及控制系统的负反馈问题作了较为深入的分析 and 介绍。本书内容深度适宜，简明扼要，适于高等学校工科各非电专业学生以及工程技术人员阅读参考。

责任编辑 王缉惠

电工学教学小丛书

负 反 馈

王鸿明 杨孟琢 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民表日*成社印刷厂印装

*

开本787×1092 1/32 印张5.125 字数109 000

1987年1月第1版 1987年1月第1次印刷

印数 00 001—3,710

书号 15010·0721 定价 0.89 元

15010·0721

前 言

本书的目的是在电工学课程的基础上对负反馈问题（包括放大电路和控制系统的负反馈问题）进行较深入的研究，以便使读者能够对负反馈问题有一个较为完整的规律性的认识，提高分析较复杂的负反馈电路和控制系统的功能。

本书内容由负反馈放大电路和反馈控制系统两部分组成。

“负反馈放大电路”是在电工学课程的基础上用方块图法对负反馈放大器问题作进一步的分析，指出负反馈放大器一般关系式使用的条件和应用一般关系式分析反馈放大电路的步骤。

“反馈控制系统”这部分内容对反馈控制系统的构成、系统稳定的判定和反馈系统设计的概念等基本问题作了较全面的介绍，目的在于扩大非电专业学生的知识面，补充电工学教材在这方面的不足。

本书在编写过程中得到了清华大学电机系应用电子学及电工学教研组许多老师的帮助，特别是宗孔德教授给予了许多指正。书稿经华中工学院李昇浩副教授审阅，并提出了修改意见，这些意见对本书的编写起了很好作用。在此向宗孔德教授、李昇浩副教授及关心本书的各位老师表示感谢。

本书第一、二章由王鸿明编写，第三章由杨孟琢编写。限

于编者的水平及所讨论问题的难度,本书中缺点和错误在所难免,望读者提出批评指正。

编 者

1985年7月

目 录

第一章 反馈放大器	1
1.1 概述	1
1.1.1 什么是负反馈	1
1.1.2 为什么要加负反馈	2
1.2 分析研究的方法	4
1.2.1 负反馈放大电路的方块图	4
1.2.2 控制系统方块图	6
1.3 负反馈放大电路的分类	7
1.3.1 反馈信号的取法	7
1.3.2 反馈信号与输入信号的联接方式	7
1.3.3 负反馈放大电路的分类	9
1.4 反馈放大电路的方块图	13
1.4.1 电压串联负反馈	14
1.4.2 电压并联负反馈	15
1.4.3 电流串联负反馈	15
1.4.4 电流并联负反馈	17
1.5 反馈放大电路的一般关系式	17
1.5.1 一般关系式	17
1.5.2 \dot{A}_F 的量纲	20
1.5.3 一般关系式的讨论	22
1.6 负反馈在放大电路中的作用	25
1.6.1 负反馈对放大倍数稳定性的影响	25
1.6.2 负反馈对放大电路输入电阻和输出电阻的影响	27

第二章 反馈放大器放大倍数计算	37
2.1 二端口网络	37
2.1.1 二端口网络的方程和参数	37
2.1.2 二端口网络的连接	44
2.2 反馈放大电路放大倍数 \dot{A}_F 的计算	46
2.2.1 \dot{A}_0 、 \dot{F} 及 \dot{A}_F 的计算	47
2.2.2 \dot{A}_F 的简单计算方法	59
2.2.3 计算举例	67
本章参考文献	84
第三章 反馈控制系统	85
3.1 控制系统的构成	86
3.2 线性系统	88
3.3 传递函数	90
3.4 反馈系统的传递函数	96
3.5 控制器	102
3.6 瞬态响应	105
3.7 稳态响应	114
3.8 判定系统稳定性的直接方法	120
3.9 回路增益对反馈系统性能的影响	124
3.10 频率响应法	128
3.11 反馈系统的设计和校正	140
附录：拉普拉斯变换对照表	154
本章参考文献	155

第一章 反馈放大器

1.1 概述

1.1.1 什么是负反馈

通过一定的方式将电路或系统的输出量全部或部分送回到它的输入端，使电路或系统的工作特性有所改变，这样的过程称为反馈。

具有反馈的电路或系统，若反馈的效果增强了电路或系统的净输入信号，则称为正反馈；反之，若引入反馈后削弱了电路或系统的净输入信号，则称为负反馈。这个概念在电工学课程中已熟知。这里有两点请读者注意：

(1) 讨论反馈问题时，经常会遇到输入量(又称给定值或输入信号)、输出量(又称被调量)和净输入信号等名词，要注意各量之间，尤其是净输入信号与输入量之间的联系与区别。净输入信号表示真正加到放大器上的信号，而输入量是外界送来的信号。在负反馈电路中，净输入信号等于输入量与反馈量之差，只有在反馈量为零时，净输入信号才与输入量相等。

例如图 1-1 所示射极输出器电路是一个负反馈放大电路，这个放大器工作时加在晶体管 b 、 e 极间的交变电压是输入信号 u_i 与反馈信号 u_f 之差，称为净输入信号(或称差值电压)，用字母 u_{di} 表示。 u_{di} 与 u_i 不等，但与 u_i 有关， $u_{di} = u_i -$

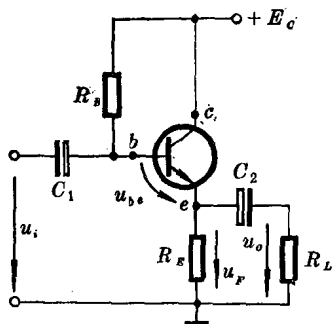


图 1-1

u_F 。

(2) 反馈量可以是电学量(简称电量),如电压、电流,也可以是非电物理量(简称非电量);因为控制系统的输出量可以是电量,也可以是非电量,如温度、转速等。输出量为非电量,需引反馈到输入电路时,首先要将该非电量通过一定方式转换成

电量。

1.1.2 为什么要加负反馈

放大电路或控制系统采用负反馈的目的是为了改善电路或系统的某些性能。

例如如图 1-1 所示的射极输出器电路,是负反馈放大电路,作用在晶体管 b, e 极间的净输入信号

$$u_{di} = u_i - u_F$$

由图 1-1 可知 $u_F = u_o$, u_o 是输出电压。

因此当图 1-1 电路负载变动而引起输出电压波动时,通过负反馈的作用使输出电压的变动减小。对图 1-1 电路来说,引入反馈后提高了放大器的输入电阻,减小了输出电阻,增强了放大器带负载的能力。

负反馈不仅广泛应用于放大电路中,亦广泛应用于自动控制系统中,用来实现对某些物理量的自动调节。

例如,工业生产中所用的电炉,要求工作在一定的温度范围内,炉温因电源电压的波动或其它原因而变化。为此就要

不断根据炉温的变化情况调节电炉的工作电压，因此可采用自动控温系统来进行控温。

图 1-2 所示的是炉温自动控制系统的原理图，其工作过程如下：热电偶将炉温转换成电信号 u_F （反馈信号）后与给定电压值 u_i （用来确定要求达到的工作温度）进行比较，其差值（对应于要求达到的炉温与炉内实际温度的偏差），经电压放大、功率放大后驱动可逆电动机运转，调节调压器的输出电压值，以改变炉温 θ 。当实际炉温低于要求的温度时，电压有效值 $u_i > u_F$ ，则电机驱动调压器滑动端上移，电炉电压增加，使炉温升高。相反，若 $u_i < u_F$ ，则电机驱动调节器滑动端向下移，电炉电压减小，使炉温降下来。当 $u_i = u_F$ 时，电机不转，加在电炉上的电压不改变。

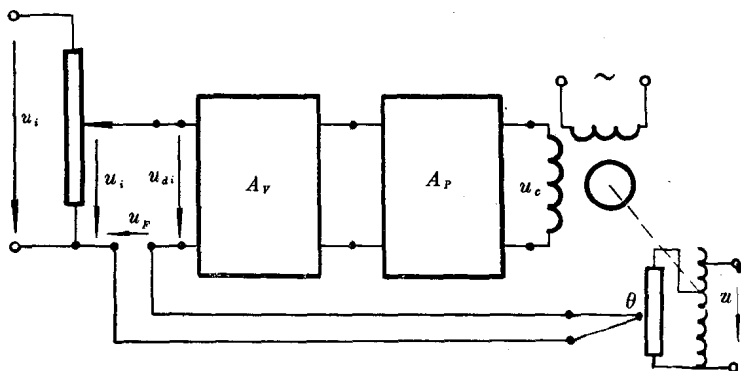


图 1-2 炉温自动控制系统

实现自动控温的方法很多，但不管哪种方法，其控制过程的原理是相似的。即反馈量不断与给定值进行比较，测量出偏差，然后纠正偏差，从而使输出保持在所允许的误差范围之内。

由上面的两个例子可知,负反馈对放大电路和控制系统的
的工作有很大的影响。为满足工作要求,通常实际应用的电
路或系统都存在着不同形式的负反馈。

1.2 分析研究的方法

本书前两章介绍放大电路的负反馈问题,控制系统的负
反馈问题则放在第三章进行介绍。放大电路加入负反馈后,
放大倍数、输入电阻、输出电阻、通频带等性能要发生变化。本
书将介绍利用“方块图”分析负反馈电路的方法。用方块图法
分析计算负反馈放大电路问题物理概念比较清楚。下面分别
介绍如何用方块图来分析负反馈放大电路和研究控制系统的
信号传递过程。

1.2.1 负反馈放大电路的方块图

先以电流串联负反馈电路为例(见图 1-3) 说明什么是
方块图。图 1-4 是图 1-3 电路的交流通道,利用反馈电阻 R_F
将放大电路的输出量 i_o ($\approx -i_e$) 引回到电路的输入回路,起
稳定输出电流的作用,因此这是电流负反馈。

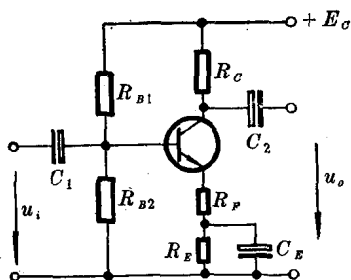


图 1-3

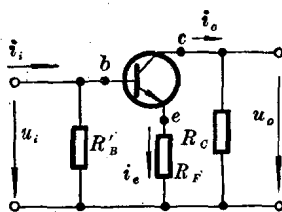


图 1-4 ($R'_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$)

为了计算该电路的电压放大倍数，可以将与图 1-4 对应的微变等效电路画出，列写输出电压与输入电压的比，计算电路的放大倍数。这种计算方法在电工学课程中是较熟悉的。现在采用另外一种方法——方块图法进行计算。为此将图 1-4 改画成图 1-5。图 1-5 与图 1-4 不同之处仅在于将图 1-4 的 e 点扩大成为一条无阻闭合导线。变形之后，可以将电路分成两个部分，即图 1-5 虚线框出的 A 和 F ，在这两个方框内的电路均可以看成是一个二端口网络，即有一个输入端口和一个输出端口。

二端口网络 A 的输入量是差值信号 u_{di} ，输出量是电流 i_o ，差值信号 $u_{di} = u_i - u_F$ 。

二端口网络 F 的输入量是电流 i_e ，输出量是电压 u_F ，电压 $u_F = i_e R_F$ 。

根据晶体三极管电流关系可知 $i_e \approx i_c$ 。

因此二端口网络 A 与二端口网络 F 之间的关系可以用图 1-6 所示的图形来说明，图中各量用复数表示^① 图 1-6 称为

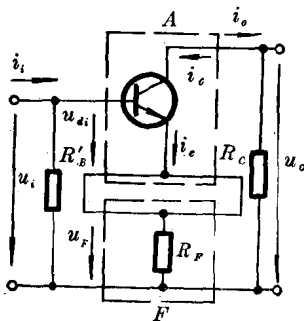


图 1-5

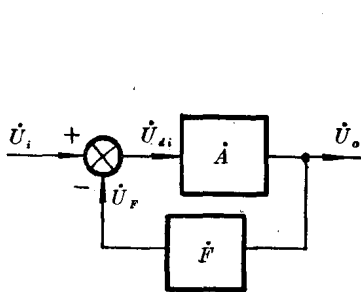


图 1-6

^① 图 1-6 中 \dot{A} 为反馈放大电路的开环放大倍数， \dot{F} 为反馈系数。详见 1.5 节。

图 1-5 电路的方块图。

图 1-6 告诉我们,一个负反馈放大电路可以这样理解,它是由一个无反馈作用的放大电路和一个反馈电路组成,放大电路的输出量送入反馈电路,输入信号与反馈电路的输出量(即反馈量)相减,产生的差值信号送入放大电路进行放大。

用图 1-6 这种形式表明反馈放大电路输入、输出与反馈量之间的关系,表明信号传递的情况,这种图形就称为方块图。换句话说,方块图是描述信号传递关系的图形。方块图只显示信号传递过程中输入量与输出量之间的函数关系,而各方块内具体是什么样的电路结构可不必考虑。

怎样画反馈放大电路的方块图,如何根据方块图分析反馈放大电路的放大倍数等问题,在下面详细介绍。

1.2.2 控制系统方块图

在研究一个控制系统信号传递过程时,系统中的每个组成部分(又称为一个环节)同样也可以用一个方块表示,整个系统同样可以画出方块图。图 1-2 所示炉温自动控制系统的方块图如图 1-7 所示:

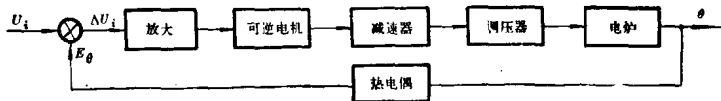


图 1-7

图 1-7 只说明信号传递的过程和控制的关系,并未涉及每个环节内具体电路的结构。

图 1-7 所示的系统方块图与图 1-6 所示的反馈放大电路的方块图是类似的。它有一条从输入传向输出的信号传递

通道和一条从输出引回到输入的反馈信号通道。所以这两种电路从结构方块图上来看没有什么区别,只不过一个环节多些,一个少些。关于控制系统问题的分析研究将在第三章中讨论。

1.3 负反馈放大电路的分类

这一节讨论负反馈放大电路的基本概念,从中引出反馈放大电路的方块图,找出应用方块图分析负反馈放大电路问题的规律。

1.3.1 反馈信号的取法

放大电路的输出端接负载后,可向负载提供一定的电压和电流。但是负载变化时会影响放大电路的工作,使输出电压和电流随之变动,因此放大倍数会随负载的变动而变化。为使放大电路的输出不受负载变动影响,达到稳定输出的目的,通常采用负反馈的方法。

反馈量的取法(又称反馈方式)有两种:从输出电压取得或从输出电流取得。反馈量取自输出电压的反馈称为电压反馈,反馈量取自输出电流的称为电流反馈。一个放大电路工作时究竟采用哪种反馈方式由负载的要求而定。工作时,负载若要求电压稳定,应采用电压反馈;负载若要求电流恒定,则采用电流反馈。电压负反馈可以使放大电路的电压放大倍数稳定;而电流负反馈稳定输出电流,故在负载变化时负载电压(即输出电压)是要随之改变的,因此电流负反馈放大电路的电压放大倍数会随负载的变化而变化。

1.3.2 反馈信号与输入信号的联接方式

负反馈放大电路的反馈信号与输入信号之间可以有两种

联接方法。第一种方法是两个信号串联相接，即以电压信号形式进行相减。例如图 1-1 所示的电压串联负反馈电路，加在晶体三极管 b 、 e 极间的差值电压 u_{di} 是输入信号 u_i 与反馈信号 u_F 之差。另一种方法是反馈信号与输入信号并联，以电流信号形式相减。实际使用时用那种方式要由信号源的内阻情况决定。

从电路理论可知，在信号源内阻相对于外界负载而言可以忽略不计时，信号源可以近似为一个恒压源，信号源的输出电压 u_i 可以视为恒定。在引入负反馈信号 u_F 后，差值信号 $u_{di} = u_i - u_F$ 送入放大器放大。因 u_i 恒定，而 u_F 是由放大电路输出量决定的，因此，当某种原因造成放大电路输出电压减小时， u_F 随之减小， u_{di} 增加， u_{di} 的增量 Δu_{di} 与 $| \Delta u_F |$ 相等，即反馈信号的变化量全部送入放大电路进行放大，反馈信号影响显著。相反，若信号源内阻较大，则信号源输出电压 u_i 不能视为恒定，要随信号电流的增大而减小。因此，当 u_F 发生变化时， u_{di} 虽然也随之改变，但改变量 Δu_{di} 较 u_i 恒定时减小，即反馈信号作用减弱，反馈效果不强。故信号源为恒压性质时应采用串联反馈方式，即以电压形式进行比较。

如果信号源内阻相对于外电路的负载而言是较大的，此时信号源近似看作恒流源。若这时反馈信号仍取电压形式和输入信号串联，反馈信号 u_F 的变化对送入放大电路的电流影响很小，致使放大电路的净输入信号 u_{di} 在 u_F 变化时几乎没有变化，这样，反馈作用不显著。所以信号源为电流源性质时要使反馈作用的效果显著，反馈信号也应以电流形式出现，与输入信号电流相减。为实现电流相减，反馈信号与输入信号之间应采用并联相接。

综上所述,反馈量与输入信号相减时,两信号之间的联接方式有两种可能,即两信号串联(称串联反馈)或两信号并联(称并联反馈)。由于信号源有两种类型,为使反馈放大电路的反馈效果显著,须合理选择反馈方式:信号源为电压源时采用串联反馈,信号源为电流源时采用并联反馈。

1.3.3 负反馈放大电路的分类

因为反馈信号与输入信号之间有两种联接方法,而反馈信号又有两种取法,因此反馈放大电路就有四种基本类型。

在分析反馈电路问题时,对各电压、电流做如下规定:直流电量用大写英文字母表示;变化量瞬时值用小写英文字母表示(如 u_i 表示输入信号);正弦交流量也可用复数形式表示(如 \dot{U}_i 表示输入交流信号、 \dot{U}_F 表示交流反馈信号)。下面介绍四种基本放大电路。

1. 电压串联负反馈

这种电路反馈量取自放大电路的输出电压,反馈量与输入信号串联相接进行相减。电压串联负反馈放大电路的一个例子如图 1-8 所示。根据图 1-8 电路的交流通道^①可以获得反馈量 u_F 与放大电路输出量 u_o 之间的关系

$$u_F \approx \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_F} \cdot u_o$$

放大电路工作时,送入晶体三极管 T_1 的 b 、 e 极间的差值信号

$$u_{di} = u_i - u_F$$

2. 电压并联负反馈

这种电路中的反馈量取自输出电压但以电流形式出现,与输入信号相减。电压并联负反馈放大电路的一个例子,如

① 参见图 1-14。

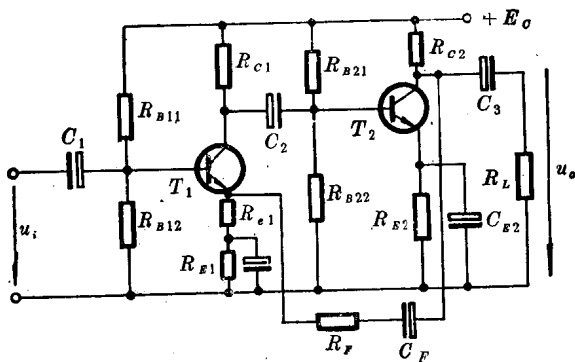


图 1-8

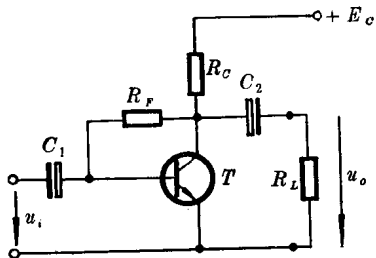


图 1-9

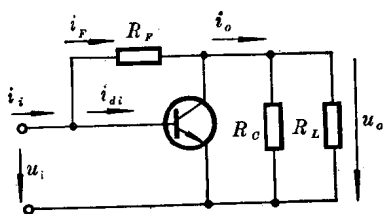


图 1-10

图 1-9 所示。图 1-9 电路的交流通道如图 1-10 所示。

根据图 1-10 可以求得反馈电流

$$i_F = \frac{u_i - u_o}{R_F}$$

若 u_i 与 u_o 相比, u_i 的幅值较 u_o 的幅值小得很多时, 将 u_i 忽略不计, 这样

$$i_F \approx -\frac{u_o}{R_F}$$

送入晶体三极管基极的差值电流